文章编号:1000-4939(2023)03-0621-09

煤层气井固井水泥冲击断裂特征与破坏模式

陈立超[1],王生维[2,3],张典坤[2]

(1. 内蒙古工业大学矿业学院,010051 呼和浩特;2. 煤与煤层气共采国家重点实验室,048204 晋城;
3. 中国地质大学(武汉)资源学院,430074 武汉)

摘 要:射孔冲击下固井水泥断裂行为与破坏失效模式是煤层气井井筒固井水泥环整体防护亟待解决的关键问题。以聚乙烯醇纤维固井水泥为对象,本研究利用霍普金森压杆装置对水泥试样进行高应变率加载,获取材料在 4 级应变率下裂缝扩展及破坏模式信息。研究表明:冲击荷载下纤维固井水泥断裂失效过程包括受压变形、裂缝起裂、裂缝扩展、裂缝贯通 4 阶段。纤维水泥的断裂速率范围在 137.93 ~513.37 m · s^{-1}间,存在应变率提升纤维水泥断裂速率增大的规律;纤维水泥冲击破坏形式包括张性劈裂、剪切破坏及混合破坏 3 类;随应变率增大,冲击下纤维水泥由剪切向混合式、劈裂式破坏过渡,材料粒度变细、破坏程度加剧,破坏机制由塑性破坏过渡为半脆性破坏。

关键词:固井水泥;射孔冲击;断裂特征;破坏模式;应变率;能量耗散;深部煤层气开发

中图分类号:TU45,TE256 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.014

Fracture behavior and failure modes of oil-well cement of deep coalbed methane wells under impact loading

CHEN Lichao[1,2],WANG Shengwei[2,3],ZHANG Diankun[2]

(1. School of Mining Technology in Inner Mongolia University of Technology,010051 Hohhot,China;
2. State Key Laboratory of Coal and CBM Co-mining in Jincheng Anthracite Mining Group,048204 Jincheng,China;
3. Faculty of Earth Resources in China University of Geosciences,430074 Wuhan,China)

Abstract: The fracture behavior and failure modes of oil-well cement under perforation impact are the key problems that need to be solved urgently in the maintenance of the annulus sealing capacity of deep gas wells and the protection of oil-well cement annulus. In this paper, polyvinyl alcohol(PVA) fiber oil-well cement was taken as the object, and high strain rates impact loading was carried out on samples of oil-well cement by using Split-Hopkinson Pressure Bar device combined with high-speed camera, so as to obtain the time history information of fracture propagation and failure modes of the oil-well cement under the strain rates of level 4. The results show that the impact fracture process of oil-well cement includes four stages: materials compression deformation, fractures initiation, fractures propagation and fractures penetration and overlapping. With the increase of strain rates, the fracture rates oil-well cement accelerates, and

收稿日期:2022-05-24 **修回日期**:2022-07-31
基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2016ZX05067001-007);山西省煤层气联合研究基金资助项目(No. 2016012007)
通信作者:陈立超,副教授。E-mail:chenlichaogas@163.com
引用格式:陈立超,王生维,张典坤. 煤层气井固井水泥冲击断裂特征与破坏模式[J]. 应用力学学报,2023,40(3):621-629.
CHEN Lichao, WANG Shengwei, ZHANG Diankun. Fracture behavior and failure modes of oil-well cement of deep coalbed methane wells under impact loading[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(3):621-629.

the fracture rates range from 137.93 to 513.37 $m \cdot s^{-1}$. The failure modes of oil-well cement include tensile splitting failure (TF), shear failure (SF) and mixed failure. With the increase of strain rate, the impact failure modes of oil-well cement change from tensile splitting mode and shear mode to mixed mode, and the particle size of material becomes finer and the degree of failure intensifies. With the increase of strain rates, the impact failure mechanisms of oil-well cement gradually changes from plastic failure to quasi-brittle failure. It can provide reference for oil-well cement integrity evaluation and material property modification of deep gas wells.

Key words: oil-well cement; perforation impact; fracture behavior; failure mode; strain rate; energy dissipation; deep coalbed methane development

射孔冲击下固井水泥断裂特征与破坏模式对固井水泥环完整性评价、射孔方案设计及水泥材料改性具有实际意义[1-3]。深部油气开发中储层流体层间互窜剧烈,对固井水泥完整性及其在射孔压裂中的抗裂性能要求更为苛刻[4-5],查明冲击荷载下固井水泥断裂特征与破坏模式已成为深部煤层气固井亟待解决的一个关键科学问题。

长期以来,围绕岩石、混凝土等准脆性材料的断裂特征与破坏模式应变率效应问题,诸多学者开展了研究。李夕兵等[6]发现常规冲击下岩石的临界破坏模式为劈裂形式,动静组合加载下呈现压剪破坏形式;宫风强等[7]发现砂岩三轴冲击下应变率较低时岩石形成压剪破裂面但整体不失稳,应变率较大时岩石破碎形成锥形块体;张智宇等[8]发现冲击应变率越大,试件完全破坏发生时间越早且破坏越严重,试件主要破裂面方向与冲击方向一致,属于冲击作用下拉伸破坏;唐志强等[9]发现高速冲击下硬度和脆性较高火山岩以劈裂破坏为主,塑性较强砂岩以压碎破坏为主;王登科等[10]发现随应变率增加,煤样破碎块度分形维数呈线性增长趋势。

针对材料冲击下断裂裂缝延展精确捕捉问题,该方面监测手段较为丰富。WONG 等[11]利用高速摄影对石膏在巴西劈裂条件下裂缝特征进行研究;李地元等[12]利用高速摄像机记录大理岩试样完整的裂纹萌生、扩展、贯通直至试样破坏的全过程;WENG 等[13]利用高速摄像机研究了预制圆孔试件在动静耦合加载条件件裂缝发育过程;YAN 等[14]利用高速摄像技术对动静耦合加载条件的砂岩试样断裂裂缝延展过程特征进行监测。LI 等[15]利用贴应变片方法对冲击下环形试件断裂裂缝发展规律及应变分布进行研究。近年来,数字图像相关(DIC)技术[16]和声发射技术[17]得到广泛应用。ZHUANG 等利用薄片镜观测了裂隙规律[18]。

针对岩石、混凝土等准脆性材料冲击破坏能量耗散问题。谢和平等[19]提出了岩体变形破坏过程能量耗散与强度、能量释放与整体破坏等概念;叶洲元等[20]研究了受三维静载压缩岩石对冲击能的吸收效应;WONG 等[21]研究了大理岩在高速加载下试件断裂耗散特征;胡俊等[22]分析了混凝土材料对冲击势能的耗能方式;黄明等[23]认为含水率的变化对岩样能量耗散特征产生较大影响;尹土兵等[24]计算出不同温度作用下动静组合加载岩石试样的能量耗散规律。陈立超等[25-26]采用 SHPB 装置试验研究了不同冲击气压固井水泥破碎能耗特征,从能量角度分析了水泥在冲击荷载下断裂特性。

综上,目前针对材料冲击下破坏特征、失效模式及破坏能量耗散等问题研究较为深入,但在煤层气井固井水泥冲击下的断裂裂缝发育规律及破坏模式问题上却鲜有研究。本研究以聚乙烯醇纤维固井水泥材料为对象,利用 Φ50 mm 霍普金森压杆对试样加载,利用高速摄像机监测试样冲击断裂裂隙发育规律,探讨试样裂隙特征、破坏程度与试样应变的时程关系,分析试样冲击断裂破坏与能量耗散的关系,对材料在高速冲击下破坏失效模式进行总结,以期为深部煤层气井固井水泥环完整性评价与材料改性提供科学参考。

1 样品与试验

1.1 水泥冲击试样

本试验所用固井水泥材料是在常规固井水泥浆体配比基础上掺加比例 1% 的聚乙烯醇(PVA)纤维完成的。按上述配比搅拌均匀的水泥浆体倒入模具中浇筑成立方块体,待水泥静置达到预期强度后拆模进行试样钻取。

按照 ISRM 要求[7]，采用岩石取芯机钻芯取样、机械切割制作圆柱形冲击试样，试样直径、高度均为 50 mm，试样顶底面打磨平整。XRD 衍射分析结果显示（图 1），本试验用固井水泥材料成分组成特征为 $CaMg(CO_3)_2$ 占比 64%、SiO_2 占比 18%、$CaCO_3$ 占比 11%、及 $Ca(OH)_2$ 占比 7%。前期研究发现材料成分成熟度较高，水化反应彻底。

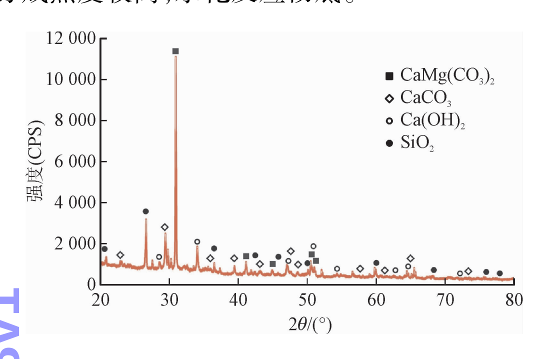


图 1　试验固井水泥材料组成特征

Fig. 1　Composition characteristics of oil-well cement

1.2　冲击试验方案

试验在中南大学霍普金森压杆试验系统完成，该系统由 50 mm 杆径高速冲击加载装置和高速摄像机组成。其中 SHPB 试验装置由冲头、入射杆、透射杆组成[6]。试验中，当入射杆受到子弹冲击时，能量以波形式先在入射杆中传播，传递到入射杆和试样接触面位置发生透射和反射。一部分能量反射回入射杆中，另一部分传递给试样。本次试验中获得的典型原始冲击波信号如图 2 所示。

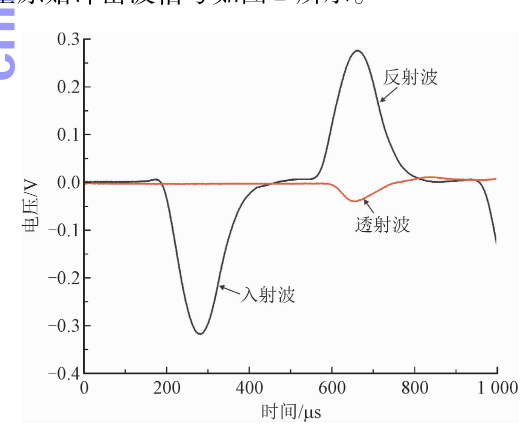


图 2　固井水泥冲击加载波形信号特征

Fig. 2　Waveform characteristics of oil-well cement under impact loading

通过超动态应变仪和入射杆、透射杆上的应变片采集形变信息[7,15]，基于应力波假定和应力均匀性假定，计算试样应力、应变和加载应变率等动态力学参数[6-7]。试验中通过调整冲击气压和杆长对 4 组固井水泥试样实施不同加载率冲击作用，获取材料压缩过程中的应力-应变时程数据及能量耗散参数。利用高速摄像机捕捉材料冲击裂缝发展及动态破坏过程现象[7]。

2　结果与分析

2.1　固井水泥材料冲击动力学参数特征

本次试验中 4 组固井水泥在不同加载率下动力学参数结果见表 1。随着应变率提升，固井水泥峰值应力、峰值应变等动态力学参数关系复杂。推测与材料非均质性以及孔裂隙等缺陷发育有关。

表 1　固井水泥高速冲击动态力学参数试验结果

Tab. 1　Test results of dynamic mechanical parameters of oil-well cement under impact loading

试样	应变率/s^{-1}	峰值强度/MPa	峰值应变/10^{-3}	总入射能/J	总耗散能/J	能量吸收率/%
FC-1	67.03	38.35	5.03	201.13	87.90	43.70
FC-2	68.47	38.68	4.04	416.08	109.16	26.24
FC-3	83.92	39.98	8.48	114.71	34.32	29.92
FC-4	96.92	39.33	7.46	248.02	88.00	35.48

注：能量吸收率 = 吸收能/入射能

2.2　固井水泥材料冲击下应力、应变-时程特征

4 组固井水泥冲击下应力-应变时程特征如图 3 所示。由图可知应变率由 67.03 s^{-1} 增至 96.92 s^{-1}，4 组水泥试样应力、应变-时程总体变化规律大致相似，且峰值强度、试样峰值应变和累积应变值等随应变率相关性不显著，反映出纤维固井水泥材料内部结构复杂性和强烈非均质性。

依据试样应变-时程曲线形态，将固井水泥冲击下形变过程分 3 个阶段：压缩致密阶段。由于材料发育孔、裂隙缺陷，冲击下材料结构会重新排布，该段应变-时程曲线斜率逐渐增大，表明试样内缺陷不断被压缩处于蓄能状态；破坏阶段。试样内储备弹性能导致材料发生破坏。该段应变-时程曲线为一斜线，试样材料变形率恒定显现塑性材料形变特征；卸载阶段。该阶段试样残余变形量较小，冲击荷载对材料已无实质影响。试样 FC-3 卸载后出现应变略降低、应力卸载速度慢情况，推测与材料裂缝愈合

或纤维拉拽效应有关。试验中试样应力-时程曲线卸载后曲线斜率均较缓，表明纤维固井水泥断裂速率较慢，表现出典型的塑性材料变形破坏特征，对于保障深部煤层气井固井水泥完整性较为有利。

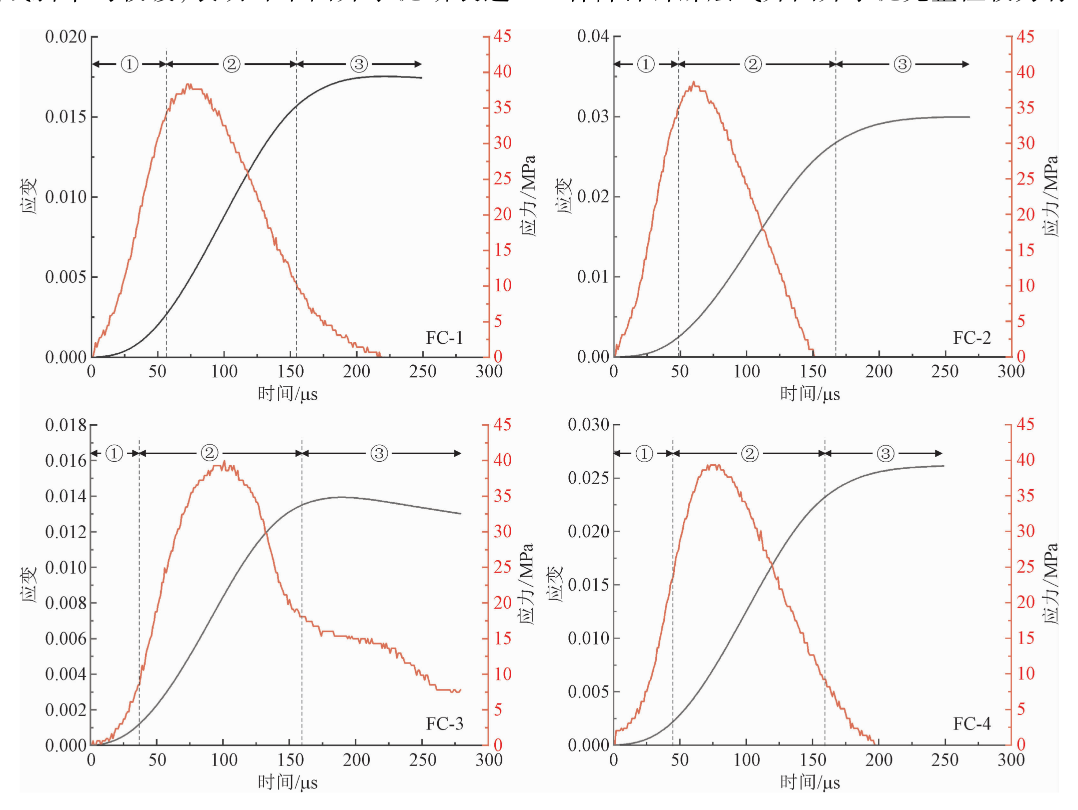


图 3　不同应变率下固井水泥应力、应变-时程特征

Fig. 3　Stress-strain time history characteristics of oil-well cement under different strain rates

2.3　固井水泥冲击裂隙扩展时程特征规律

固井水泥冲击下裂缝发展规律如图 4 所示，加载初期试样仅发生体积压缩变形未见断裂。加载至 80 μs 时，试样发生断裂破坏。表现为试样端部产生剪切裂缝(SF)，缝长度 3～4 mm，裂缝发育方位与冲击方向夹角小于 45°。为典型的压缩作用形成剪切破裂。同时在试样端部形成少量张性裂隙(TF)。加载时间由 100～200 μs 时，试样端部起裂的张性裂缝向前扩展，形成裂隙长度 1 cm 的弥散性密集裂缝。加载时间 400 μs 时，水泥试样张性裂隙扩展贯通，裂隙宽度增大到 0.10 mm 以上，形成多组张性节理组成的雁行状共轭节理。加载时间 600 μs 时，水泥试样横向形变明显，材料发生膨胀变形。

整体上纤维固井水泥材料冲击断裂模式包括：张性劈裂、剪切破裂以及混合型破坏。其中张性劈裂形成裂缝密度较大，该类裂缝延展方位常与冲击加载方向平行；而剪切破裂裂缝密度较小，裂缝方向与冲击加载方向呈小角度相交；混合式破坏主要由大量弥散式小裂缝组成。射孔冲击下深部煤层气井固井水泥材料发生上述断裂破坏，后期裂缝贯通形成煤层气水等流体串通通道。

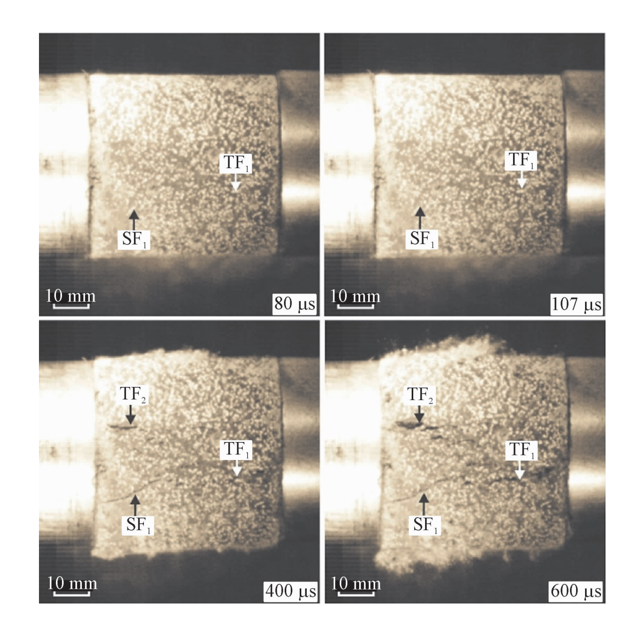


图 4　冲击下固井水泥断裂裂隙扩展时程特征

Fig. 4　Time-history characteristics of fracture expansion under impact loading of cement

3 讨　论

3.1　应变率对固井水泥冲击断裂与破坏模式影响

固井水泥射孔冲击下断裂裂缝延展及破坏模式见图 5。图 5(a)显示加载应变率 67.03 s^{-1}时，试样 FC-1 冲击断裂形式包括：张性劈裂裂缝；裂缝方向与加载方向一致，裂缝延展平直切穿试样，最终试样破坏成长条状碎块；共轭剪切裂缝，裂缝延展方位与试样轴线呈小于 45°相交，而且裂缝面平直，冲击下试样沿剪切面滑移扩径。加载下纤维固井水泥材料低应变率破坏以张性劈裂破坏为主，为深部煤层气流体串通提供优势通道。

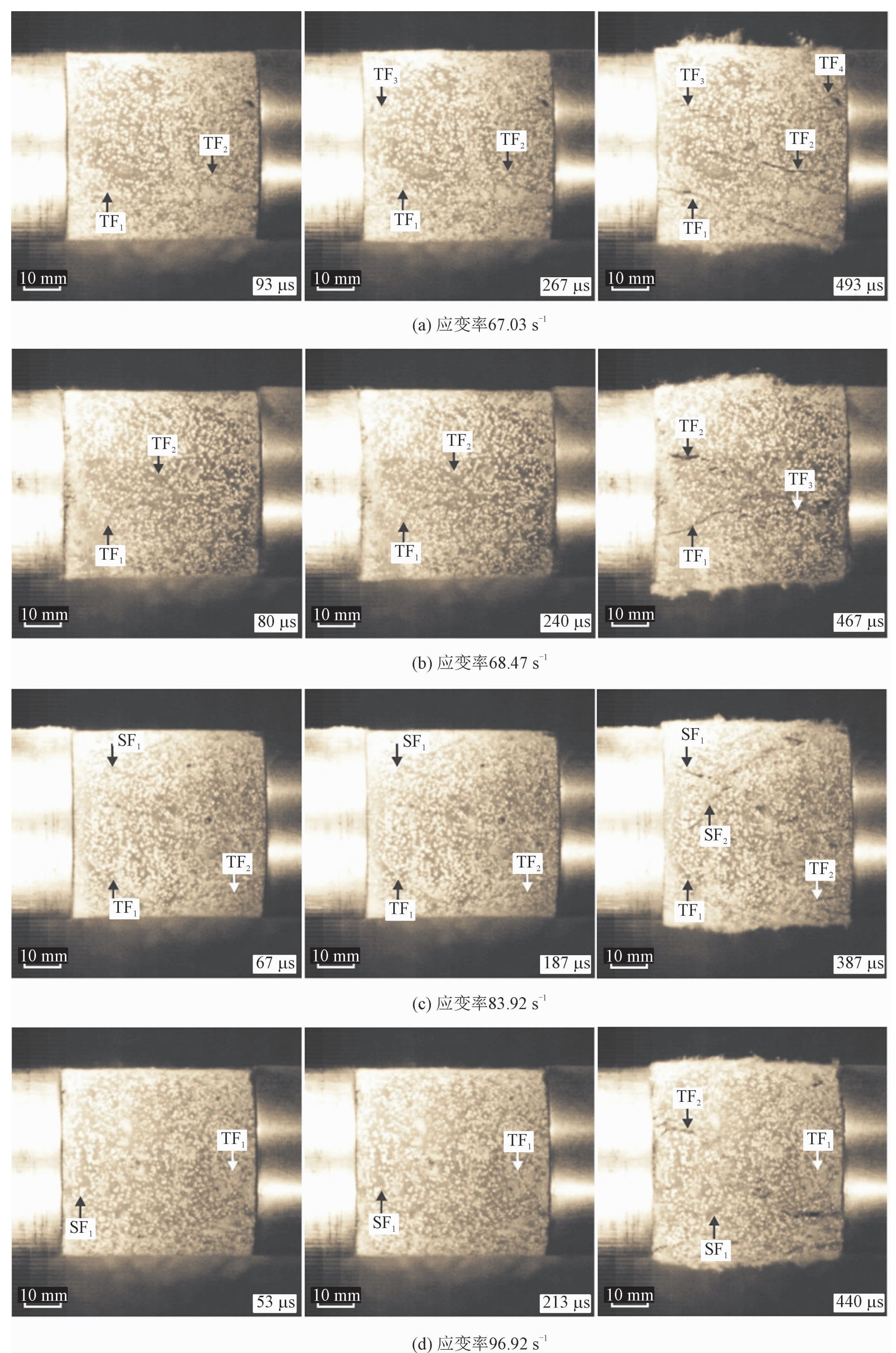


图 5　固井水泥冲击下裂缝特征与破坏模式应变率效应

Fig. 5　Strain rate effects of fracture behavior and failure modes under impact loading of oil-well cement

图 5(b)所示应变率 68.47 s^{-1}时,试样 FC-2 断裂以张性劈裂与剪切为主,裂缝延展路径更曲折断裂耗能较高。冲击下材料在高应变率变形中纤维被拉断,试样破坏形成粒径 0.1 mm 以下的粉末。由于颗粒可以充填裂缝,对维护固井水泥的封隔能力更有利。随应变率增大,试样 FC-3、FC-4 断裂形式与上述试样基本相同。由于应变率更高,冲击粉体的比重分别约占试样体积的 30% 和 50%(图 5c ~ 5d)。总体随应变率提升,固井水泥破坏模式由剪切、混合式向张性劈裂过渡,破坏程度加剧,形成粉末占比增大。材料破坏机制由塑性破坏转变为半脆性破坏。对于固井水泥封隔能力而言,试样破碎粒度更细,推测有利于防止地下流体串通。

3.2 应变、能量-时程特征对固井水泥冲击破坏影响

纤维固井水泥材料不同应变率条件下应变、能量-时程特征如图 6 所示。随着加载进行试样应变规律可分为 3 个阶段:①起裂阶段,该阶段试样受压变形蓄能,当试样应变达到材料抗裂阈值时,发生断裂破坏,在试样内部产生裂缝,该阶段对应临界应变值为 0.002 5;②扩容阶段,冲击断裂裂缝逐步拓宽延长,裂缝空间增加,试样发生显著的形变扩容,试样应变值为 0.015 时,应变维持恒定;③卸载后稳定阶段,应变维持恒定。

随着入射能增加耗散能随之增大,二者呈较好的相关性和时程同步性,且入射能、耗散能其时程变化与试样应变时程变化间也存在同步性。试样的变形断裂破坏过程与能量的演化存在内在关联。即冲击加载初期为试样的断裂裂缝的起裂阶段,此时对应的耗散能主要用于材料的断裂和裂缝的起裂,称为起裂能;后期随着加载持续裂缝不断扩展,该阶段对应的耗散能主要用于裂缝的扩展,称为延展能[27-28]。

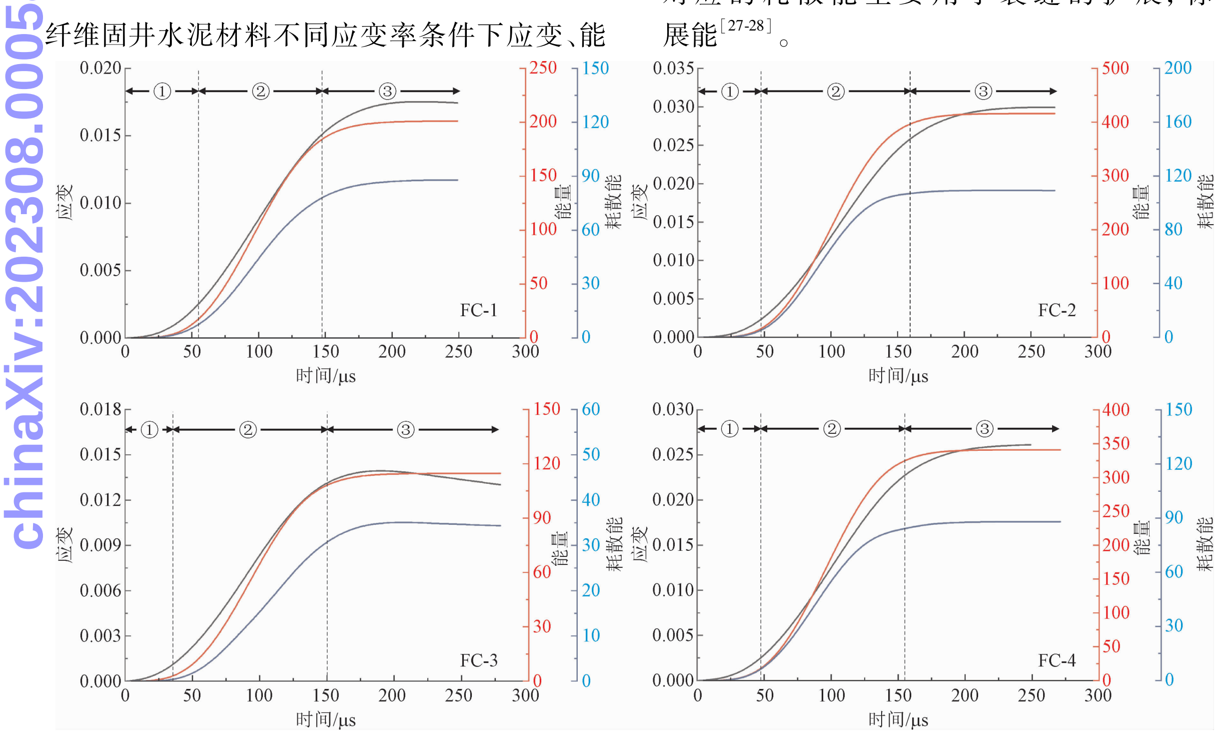


图 6 不同应变率下固井水泥试样应变、能量-时程特征

Fig. 6 Time-history characteristics of strain-energy of oil-well cement under different strain rates

3.3 应变率对固井水泥动态断裂速率影响

利用高速摄影图像对不同应变率下水泥试样断裂裂缝扩展参数进行计算,结果详见表 2。固井水泥初始断裂时间在 35 ~ 49 μs,处在试样压缩应变时间,而试样完全断开时间在 145 ~ 158 μs,处于试样卸载后阶段,且结合试验断裂耗能特征认为其与加载应变率无内在关系;在断裂裂缝延展速率与材料断裂形式关系方面,试样 FC-1、FC-2 张性断裂裂缝延展速率范围为 137.93 ~ 283.33 m·s^{-1}和 268.46 ~ 312.50 m·s^{-1}。而试样 FC-3、FC-4 剪切裂缝裂缝延展速率分别为 459.89 m·s^{-1}和 513.37 m·s^{-1},远低于花岗岩材料的冲击裂缝延展速率,表明纤维掺入明显提升了固井水泥的抗裂能力。随着加载应变率增大,固井水泥试样断裂裂缝延展速率提升。高速加载下,高应变率条件张性劈裂裂缝延展速率

要高于剪切裂缝。因此，对于深部煤层气井固井水泥环而言，高速射孔会形成更大尺寸的流体窜槽。

表 2　不同应变率下固井水泥裂缝延展速率及其与应力、应变、能量间的关系

Tab. 2　Fracture propagation of cement under different strain rates and their relationship with stress, strain and energy

试样	应变率	试样开始断裂				试样完全断开				裂缝特征			
		时间/μs	应变	应力/MPa	耗散能/J	时间/μs	应变	应力/MPa	耗散能/J	裂缝	延展时间/μs	长度/mm	延展速率/($m \cdot s^{-1}$)
FC-1	67.03	55	0.002 5	35.00	12	145	0.015	9.00	130	TF_1	240	68	283.33
										TF_2	267	62	232.21
										TF_3	87	12	137.93
										TF_4	40	10	250.00
FC-2	68.47	49	0.002 5	36.55	12	158	0.025		260	TF_1	240	75	312.50
										TF_2	298	80	268.46
FC-3	83.92	35	0.0015	25.00	2	150	0.013	17.00	80	SF_1	187	86	459.89
FC-4	96.92	49	0.002 5	25.00	15	155	0.023	9.00	230	SF_1	187	96	513.37

3.4　不同应变率固井水泥材料冲击破坏模式

图 7 为不同应变率下固井水泥破坏模式。如图 7(a)所示，低应变率下固井水泥试样破坏形式以劈裂张性裂隙为主；如图 7(b)所示，如随应变率提升，固井水泥破坏方式在原有张性裂缝上叠合共轭剪切型裂缝组；如图 7(c)～(d)所示，随着加载应变率增大，固井水泥破坏形式由张性劈裂过渡为冲击剪切混合式破坏，这种破坏模式随加载应变率的关系与常规脆性、准脆性材料破坏方式不同，主要是由于本次试验所用固井水泥为内部填加了纤维材料，冲击作用下固井水泥内短纤维能够协调冲击载荷，冲击下材料会发生整体协调变形。就水泥固井效果而言，图 7(c)～(d) 中固井水泥材料冲击破坏模式相较图 7(a)～(b)中破坏模式更有利，主要原因是材料吸能效率更高。纤维固井水泥在高应变率形变下吸收了更多冲击能量；固井水泥材料冲击破坏程度更严重，但主干裂缝不发育，地下流体无优势的窜流通道。

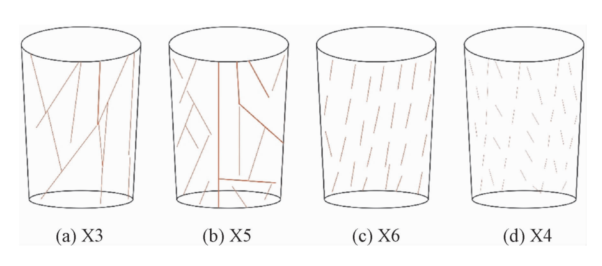


图 7　不同应变率下固井水泥冲击破坏模式

Fig. 7　Failure modes of oil-well cement under different strain rates

3.5　固井水泥冲击荷载下的断裂增韧机制

结合前人研究[29]，本研究认为纤维固井水泥材料在冲击作用下主要包括如下 3 种增韧机制：①裂缝转向：固井水泥材料中纤维周围存在一定的应力场，或者是纤维和基质之间的结合强度相对较弱导致二者间能够在应力作用下发生界面开裂；从能量角度来看，界面解离产生了新表面，需要耗散大量能量，因此，裂纹偏转可以产生明显增韧作用。②纤维桥接：由于纤维的拉拽作用导致材料往往无法完全断开，而是通过纤维把裂纹两端桥接起来，在裂纹表面产生一个压应力，抵消外加拉应力作用，使裂纹难以进一步扩展，起到增韧作用。③纤维拔出：固井水泥材料中纤维的拔出需要克服纤维/基体之间滑移阻力，该过程需要消耗大量的功因此可起到增韧作用。这些增韧机制使纤维固井水泥的失效模式相比于单相固井水泥材料突变式的脆性断裂形式，纤维固井水泥材料的破坏形式对于深部煤层气井防冲击、提升井筒环空封隔能力更为有利。

4　结　论

1) 利用 SHPB 高速加载结合高速摄像仪发现纤维固井水泥试样冲击断裂破坏演化阶段为：加载初期试样发生压缩变形，中期试样端部形成张性裂缝，裂隙发育方位与冲击加载方向夹角小于45°，后期试样端部张性裂缝不断扩展，裂隙条数增加扩展贯通，试样发生整体性破坏。

2)纤维固井水泥材料冲击下破坏模式包括:张性劈裂、剪切断裂、混合型破坏。张性劈裂裂缝裂缝密度大,裂缝发育方位多与冲击加载方向一致;而剪切裂缝密度较小,裂缝方向与冲击加载方向呈小角度相交;混合式破坏主要由大量弥散式小裂缝组成。

3)随着加载应变率的提升,纤维固井水泥试样破坏模式由剪切破坏、张性劈裂及混合式破坏过渡,固井水泥断裂速率显著提升。固井水泥破坏机制由塑性破坏转变为半脆性破坏,试样破碎程度更高,形成粉体占比大。试样破碎粒度更细,程度更高,可能更有利于深部煤层气地下流体的封隔。

4)裂缝转向、纤维桥接、纤维拔出是纤维固井水泥在冲击荷载作用下的主要增韧机制。

参考文献:

[1] 沈吉云,石林,李勇,等. 大压差条件下水泥环密封完整性分析及展望[J]. 天然气工业,2017,37(4):98-108.
SHEN Jiyun,SHI Lin,LI Yong,et al. Analysis and perspective of cement sheath integrity under a high differential pressure[J]. Natural gas industry,2017,37(4):98-108(in Chinese).

[2] DE A J,SANGESLAND S. Cement sheath failure mechanisms:Numerical estimates to design for long-term well integrity[J]. Journal of petroleum science and engineering,2016,147:682-698.

[3] 陈立超,王生维,何俊铧,等. 煤层气井近井压裂裂缝充填特征与堵塞机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(6):117-122.
CHEN Lichao,WANG Shengwei,HE Junhua,et al. Filling characteristics and plugging mechanisms of hydraulic fractures near CBM vertical wells[J]. Journal of China University of Petroleum(edition of natural science),2017,41(6):117-122(in Chinese).

[4] 张典坤,陈立超,王生维. 压痕法评价煤层气井固井水泥石断裂力学性质[J]. 天然气工业,2020,40(3):115-122.
ZHANG Diankun,CHEN Lichao,WANG Shengwei. Evaluation of fracture mechanical properties of set cement in CBM wells by the indentation method[J]. Natural gas industry,2020,40(3):115-122(in Chinese).

[5] 陈立超,王生维,张典坤,等. 固井水泥浆侵入对煤储层压裂裂缝延展的影响[J]. 天然气工业,2019,39(8):74-81.
CHEN Lichao,WANG Shengwei,ZHANG Diankun,et al. Impact of cement slurry invasion on the propagation of hydraulic fractures in coal reservoirs[J]. Natural gas industry,2019,39(8):74-81(in Chinese).

[6] 李夕兵,宫凤强,ZHAO J,等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):251-260.
LI Xibing,GONG Fengqiang,ZHAO J,et al. Test study of impact failure of rock subjected to one- dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2010,29(2):251-260(in Chinese).

[7] 宫凤强,李夕兵,刘希灵. 三轴SHPB加载下砂岩力学特性及破坏模式试验研究[J]. 振动与冲击,2012,31(8):29-32.
GONG Fengqiang,LI Xibing,LIU Xiling. Tests for sandstone mechnical properties and failure model under triaxial SHPB loading[J]. Journal of vibration and shock,2012,31(8):29-32(in Chinese).

[8] 张智宇,王建国,黄永辉,等. 白云岩动力学特性及破坏模式试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2018,14(5):1195-1201.
ZHANG Zhiyu,WANG Jianguo,HUANG Yonghui,et al. Experimental analysis on dynamic characteristics and failure mode of deep dolomite based on high-speed photography[J]. Chinese journal of underground space and engineering,2018,14(5):1195-1201(in Chinese).

[9] 唐志强,李皋,石祥超,等. 岩石单轴冲击加载破碎特征分析[J]. 应用力学学报,2019,36(5):1076-1081.
TANG Zhiqiang,LI Gao,SHI Xiangchao,et al. Analysis of rock fragmentation characteristics under uniaxial impact loading[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(5):1076-1081(in Chinese).

[10] 王登科,刘淑敏,魏建平,等. 冲击载荷作用下煤的破坏特性试验研究[J]. 采矿与安全工程学报,2017,34(3):594-600.
WANG Dengke,LIU Shumin,WEI Jianping,et al. The failure characteristics of coal under impact load in laboratory[J]. Journal of mining & safety engineering,2017,34(3):594-600(in Chinese).

[11] WONG L N Y,ZOU C J,CHENG Y. Fracturing and failure behavior of carrara marble in quasistatic and dynamic Brazilian disc tests[J]. Rock mechanics and rock engineering,2014,47(4):1117-1133.

[12] 李地元,韩震宇,孙小磊,等. 含预制裂隙大理岩SHPB动态力学破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(12):2872-2883.
LI Diyuan,HAN Zhenyu,SUN Xiaolei,et al. Characteristics of dynamic failure of marble with artificial flaws under split Hopkinson pressure bar tests[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2017,36(12):2872-2883(in Chinese).

[13] WENG L,LI X B,TAHERI A,et al. Fracture evolution around a cavity in brittle rock under uniaxial compression and coupled static-dynamic loads[J]. Rock mechanics and rock engineering,2018,51(2):531-545.

[14] YAN Z L,DAI F,LIU Y,et al. Dynamic strength and cracking behaviors of single-flawed rock subjected to coupled static-dynamic compression[J]. Rock mechanics and rock engineering,2020,53(9):4289-4298.

[15] LI X B,WU Q H,TAO M,et al. Dynamic Brazilian splitting test of ring-shaped specimens with different hole diameters[J]. Rock mechanics and rock engineering,2016,49(10):4143-4151.

[16] LOTIDIS M A,NOMIKOS P P,SOFIANOS A I. Laboratory study of the fracturing process in marble and plaster hollow plates subjected to uniaxial compression by combined acoustic emission and digital image correlation techniques[J]. Rock mechanics and rock engineering,2020,53(4):1953-1971.

[17] SHARAFISAFA M,SHEN L M. Experimental investigation of dy-

namic fracture patterns of 3D printed rock-like material under impact with digital image correlation[J]. Rock mechanics and rock engineering,2020,53(8):3589-3607.

[18] ZHUANG L,JUNG S G,DIAZ M,et al. Laboratory true triaxial hydraulic fracturing of granite under six fluid injection schemes and Grain-Scale fracture observations[J]. Rock mechanics and rock engineering,2020,53(10):4329-4344.

[19] 谢和平,鞠杨,黎立云,等. 岩体变形破坏过程的能量机制[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1729-1740.
XIE Heping,JU Yang,LI Liyun,et al. Energy mechanism of deformation and failure of rock masses[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2008,27(9):1729-1740(in Chinese).

[20] 叶洲元,李夕兵,万国香,等. 受三维静载压缩岩石对冲击能的吸收效应[J]. 爆炸与冲击,2009,29(4):419-424.
YE Zhouyuan,LI Xibing,WAN Guoxiang,et al. Impact energy-absorption property of rock under tri-axial compression[J]. Explosion and shock waves,2009,29(4):419-424(in Chinese).

[21] WONG L N Y,LI Z H,KANG H M,et al. Dynamic loading of Carrara marble in a heated state[J]. Rock mechanics and rock engineering,2017,50(6):1487-1505.

[22] 胡俊,任建伟,吴德义. 冲击荷载下轻骨料混凝土的动态耗能贡献率研究[J]. 应用力学学报,2018,35(5):1022-1028.
HU Jun,REN Jianwei,WU Deyi. The components working ratio of concrete contained light-weighting aggregates in energy absorption under impact loading[J]. Chinese journal of applied mechanics,2018,35(5):1022-1028(in Chinese).

[23] 黄明,詹金武,胡柳青,等. 三峡库区泥质粉砂岩的 SHPB 试验及能量耗散特征研究[J]. 工程地质学报,2015,23(6):1175-1181.
HUANG Ming,ZHAN Jinwu,HU Liuqing,et al. Split Hopkinson pressure bar test and energy dissipation characteristics of argillaceous siltstone in Three Gorges Reservoir region[J]. Journal of engineering geology,2015,23(6):1175-1181(in Chinese).

[24] 尹土兵,李夕兵,叶洲元,等. 温-压耦合及动力扰动下岩石破碎的能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(6):1197-1202.
YIN Tubing,LI Xibing,YE Zhouyuan,et al. Energy dissipation of rock fracture under thermo-mechanical coupling and dynamic disturbances[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2013,32(6):1197-1202(in Chinese).

[25] 陈立超,王生维,张典坤. 基于 SHPB 实验的煤层气井固井水泥冲击能量耗散特征研究[J]. 材料导报,2021,35(增刊1):232-237.
CHEN Lichao,WANG Shengwei,ZHANG Diankun. Research on impact energy dissipation characteristics of cement of coalbed methane wells based on SHPB test[J]. Materials review,2021,35(S1):232-237(in Chinese).

[26] 陈立超,张典坤,吕帅锋. 碳纳米管复合固井水泥动静态断裂性能试验研究[J]. 材料导报,2022,36(增刊2):156-161.
CHEN Lichao,ZHANG Diankun,LÜ Shuaifeng. Experimental study on dynamic and static fracture performance of carbon nanotubes cement[J]. Materials review,2022,36(S2):156-161(in Chinese).

[27] WANG Y,TAN W H,LIU D Q,et al. On anisotropic fracture evolution and energy mechanism during marble failure under uniaxial deformation[J]. Rock mechanics and rock engineering,2019,52(10):3567-3583.

[28] 陈立超,王生维,张典坤. SCB 试验测试固井水泥断裂力学性能[J]. 天然气工业,2021,41(9):105-113.
CHEN Lichao,WANG Shengwei,ZHANG Diankun. SCB experimental study on fracture mechanical properties of cement[J]. Natural gas industry,2021,41(9):105-113(in Chinese).

（编辑　史淑英）